

**OPTIMASI PENEMPATAN DAN KAPASITAS *MULTI FACTS*  
*DEVICES* PADA SISTEM TENAGA LISTRIK MENGGUNAKAN  
METODE *PARTICLE SWARM OPTIMIZATION* (PSO)**

**PUBLIKASI JURNAL SKRIPSI**

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO**



Disusun oleh:

**PARAMITA DWI PUTRI PRANYATA**

**NIM. 105060301111009-63**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN  
UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
MALANG  
2014**

**LEMBAR PERSETUJUAN**

**OPTIMASI PENEMPATAN DAN KAPASITAS *MULTI FACTS*  
*DEVICES* PADA SISTEM TENAGA LISTRIK MENGGUNAKAN  
METODE *PARTICLE SWARM OPTIMIZATION* (PSO)**

**PUBLIKASI JURNAL SKRIPSI**

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO**



**Disusun oleh:**

**PARAMITA DWI PUTRI PRANYATA  
NIM. 105060301111009-63**

**Telah diperiksa dan disetujui oleh:**

**Dosen Pembimbing I**

**Dosen Pembimbing II**

**Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D.  
NIP. 19730520 200801 1 013**

**Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc.  
NIP. 19680122 199512 2 001**

# Optimasi Penempatan dan Kapasitas *Multi FACTS Devices* pada Sistem Tenaga Listrik Menggunakan Metode *Particle Swarm Optimization* (PSO)

Paramita Dwi Putri Pranyata<sup>1</sup>, Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D.<sup>2</sup>, Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, <sup>2,3</sup>Dosen Jurusan Teknik Elektro, Universitas Brawijaya

Jalan MT Haryono 167, Malang 65145, Indonesia

E-mail: [putripranyata91@gmail.com](mailto:putripranyata91@gmail.com)

**Abstrak**—Seiring dengan bertambahnya beban yang harus ditanggung oleh sistem tenaga listrik, bertambah pula jumlah pembangkitan dan saluran transmisi yang dibutuhkan. Hal ini menyebabkan sistem menjadi lebih kompleks, rentan terhadap gangguan, dan bervariasi level tegangan. Pada penelitian ini dikaji koordinasi dua buah peralatan FACTS, yaitu *Thyristor Controlled Series Capacitor* (TCSC) dan *Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer* (TCPST) untuk mengatasi masalah penurunan level tegangan dan rugi-rugi daya transmisi. Analisis dilakukan dengan menggunakan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO). Metode ini diterapkan pada sistem tenaga listrik 500kV Jawa-Madura-Bali, dengan mengasumsikan dua macam kondisi pembebanan, yaitu 75% dan 100%. Keefektifan penempatan TCSC-TCPST juga dibandingkan dengan optimasi penempatan kapasitor bank. Hasil penelitian menunjukkan pada pembebanan 100% penempatan optimal TCSC-TCPST lebih efektif daripada penempatan kapasitor bank dalam mengurangi rugi daya sistem, yaitu diperoleh pengurangan sebesar 10,28% dengan menggunakan TCSC-TCPST serta 5,727% dengan menggunakan kapasitor bank. Dibuktikan juga bahwa level tegangan dapat diperbaiki hingga berada pada batas tegangan yang diijinkan. Penurunan rugi daya dan perbaikan level tegangan juga diperoleh pada kondisi pembebanan 75%.

**Kata kunci**— kapasitor bank, PSO, TCPST, TCSC

## I. PENDAHULUAN

Pertumbuhan jumlah penduduk di Indonesia tiap tahun semakin meningkat, sehingga membawa dampak bagi sistem tenaga listrik. Peningkatan jumlah penduduk turut meningkatkan angka beban yang harus ditanggung oleh sistem tenaga listrik. Seiring dengan bertambahnya beban, bertambah pula kebutuhan jumlah pembangkitan dan jumlah saluran transmisi yang membuat sistem semakin kompleks dan rentan terhadap gangguan. Perubahan beban, komposisi unit pembangkit yang beroperasi serta perubahan konfigurasi jaringan akan berdampak pada bervariasinya level tegangan pada gardu induk [1]. Oleh karenanya dibutuhkan sistem kompensasi daya yang dapat mengikuti perubahan level tegangan tersebut.

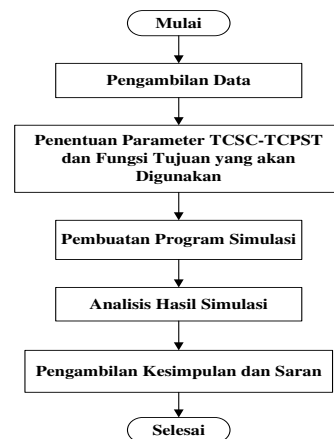
Beberapa cara untuk menstabilkan level tegangan dan mengurangi rugi daya antara lain dengan menempatkan peralatan konvensional kapasitor bank atau dengan menggunakan peralatan *Flexible Alternating Current Transmission System* (FACTS). Pada penelitian ini dikaji koordinasi dua buah peralatan FACTS, yaitu *Thyristor Controlled Series Capacitor* (TCSC) dan *Thyristor Controlled Phase Shifting*

*Transformer* (TCPST) untuk mengatasi masalah penurunan level tegangan dan rugi-rugi daya transmisi. TCSC digunakan untuk mengkompensasi reaktansi dari saluran transmisi dan TCPST berfungsi sebagai pengendali aliran daya aktif dengan menitikberatkan pada pengaturan sudut fasa tegangan.

Permasalahan umum dalam sebuah sistem adalah penentuan lokasi dan rating optimal dari peralatan FACTS. Pada penelitian ini metode yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan optimasi adalah dengan menggunakan *Particle Swarm Optimization* (PSO). PSO merupakan metode algoritma yang mengadopsi tingkah laku sosial pada kawanan burung yang terbang bersama-sama untuk mencari makanan.

## II. PENERAPAN METODE OPTIMASI PSO

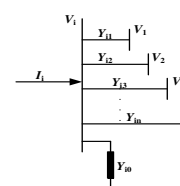
Alur penerapan metode PSO secara umum ditunjukkan pada Gambar 1. Dalam penelitian ini, metode PSO diaplikasikan pada data sistem tenaga listrik 500kV Jawa-Madura-Bali tanggal 7 Mei 2013 pukul 10.00 WIB yang terdiri dari 26 bus [2].



Gambar 1. Diagram alir metode penelitian

### A. Analisis Aliran Daya

Analisis aliran daya dilakukan untuk mengetahui sudut dan besar tegangan pada tiap bus, impedansi saluran, daya aktif, dan daya reaktif yang mengalir pada saluran transmisi. Representasi dari saluran transmisi ditunjukkan seperti pada Gambar 2 [3] :



Gambar 2. Tipikal bus pada sistem tenaga [3]

Dari Gambar 2, tegangan bus dan arus dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (1) :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1i} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2i} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \cdots & Y_{ii} & \cdots & Y_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{ni} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$I_{bus} = Y_{bus} \cdot V_{bus} \quad (2)$$

Nilai arus dapat dicari dengan menggunakan hukum Kirchhoff sebagai berikut [3] :

$$I_i = Y_{i0} V_i + Y_{i1}(V_i - V_1) + Y_{i2}(V_i - V_2) + \cdots + Y_{in}(V_i - V_n) \quad (3)$$

atau

$$I_i = V_i \sum_{j=0}^n Y_{ij} - \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j, \quad j \neq i \quad (4)$$

dengan  $I_i$  merupakan arus yang masuk ke bus  $i$ ,  $V_i$  adalah tegangan pada bus  $i$ , dan  $Y_{ij}$  adalah admitansi antara bus  $i$  dan  $j$ .

Dari Persamaan (4), arus yang memasuki bus dapat ditulis ulang dalam bentuk matriks admitansi seperti Persamaan (5) [3] :

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (5)$$

Substitusi Persamaan (3) dan (5), maka diperoleh ;

$$P_i - jQ_i = (|V_i| \angle -\delta_i) (\sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j) \quad (6)$$

dengan memisahkan bagian *real* dan imajiner, maka didapatkan :

$$P_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_i| |V_j| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (7)$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_i| |V_j| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (8)$$

dengan  $I_i$  merupakan arus pada bus  $i$ ,  $V_i$  adalah tegangan pada bus  $i$ ,  $V_j$  adalah tegangan pada bus  $j$ ,  $Y_{ij}$  adalah admitansi antara bus  $i$  dan  $j$ ,  $P_i$  adalah daya aktif pada bus  $i$ ,  $Q_i$  adalah daya reaktif pada bus  $i$ ,  $\theta_{ij}$  adalah sudut polar admitansi  $Y_{ij}$ , dan  $\delta_j$  adalah sudut tegangan  $V_j$ .

Matriks Jacobian memberikan hubungan antara perubahan kecil pada sudut tegangan  $\Delta \delta^{(k)}_i$  dan *magnitude* tegangan  $\Delta |V^{(k)}_i|$  dengan perubahan kecil pada daya aktif dan reaktif  $\Delta P^{(k)}_i$  dan  $\Delta Q^{(k)}_i$ . Dalam bentuk yang lebih singkat, matriks di atas dapat ditulis sebagai :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (9)$$

$\Delta P^{(k)}_i$  dan  $\Delta Q^{(k)}_i$  adalah selisih antara nilai yang diharapkan dan nilai sebenarnya atau dikenal sebagai daya residu, dirumuskan dengan :

$$\Delta P^{(k)}_i = P^{sch}_i - P^{(k)}_i \quad (10)$$

$$\Delta Q^{(k)}_i = Q^{sch}_i - Q^{(k)}_i \quad (11)$$

sehingga didapatkan nilai tegangan dan sudut baru, yaitu :

$$\delta^{(k+1)}_i = \delta^{(k)}_i + \Delta \delta^{(k)}_i \quad (12)$$

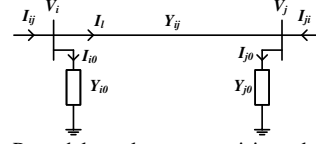
$$|V^{(k+1)}_i| = |V^{(k)}_i| + \Delta |V^{(k)}_i| \quad (13)$$

Langkah selanjutnya adalah perhitungan rugi-rugi saluran. Aliran arus diasumsikan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Jika arus mengalir dari  $i$  ke  $j$ , maka:

$$I_{ij} = I_i + I_{i0} = Y_{ij}(V_i - V_j) + Y_{i0}V_i \quad (14)$$

Apabila ditinjau dari sisi bus  $i$ , maka arus yang mengalir bernilai negatif seperti Persamaan (15):

$$I_{ji} = -I_i + I_{j0} = Y_{ij}(V_j - V_i) + Y_{j0}V_j \quad (15)$$



Gambar 3. Pemodelan saluran transmisi untuk perhitungan aliran daya [3]

Daya kompleks  $S_{ij}$  dari bus  $i$  ke  $j$  dan  $S_{ji}$  dari bus  $j$  ke  $i$  adalah:

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* = V_i (V_i^* - V_j^*) Y_{ij}^* + V_i V_i^* Y_{i0}^* \quad (16)$$

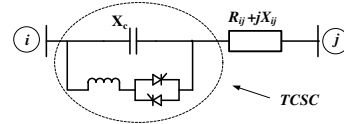
$$S_{ji} = V_j I_{ji}^* = V_j (V_j^* - V_i^*) Y_{ij}^* + V_j V_j^* Y_{j0}^* \quad (17)$$

$$S_{Lij} = S_{ij} + S_{ji} \quad (18)$$

dengan  $S_{Lij}$  merupakan total rugi daya saluran dari  $i$  ke  $j$  (MVA).

### B. Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)

TCSC adalah salah satu jenis peralatan FACTS yang merupakan kombinasi antara komponen Thyristor Controlled Reactor (TCR) dengan kapasitor [4]. TCR terdiri dari induktor yang terhubung seri dengan thyristor. TCSC mampu mengatur reaktansi saluran transmisi dengan melakukan pengaturan sudut penyalan thyristor. Gambar 4 merupakan rangkaian sederhana dari TCSC.

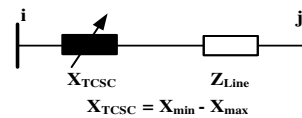


Gambar 4. Rangkaian sederhana TCSC [5]

Untuk mencegah terjadinya kompensasi berlebihan, derajat kompensasi TCSC diatur pada nilai 20% induktif dan 70% kapasitif atau  $-0,7X_{line}$  hingga  $0,2X_{line}$ [6], sehingga :

$$r_{TCSCmin} = -0,7 \quad r_{TCSCmax} = 0,2$$

Pemodelan TCSC dengan persamaannya yang dapat mengubah nilai reaktansi saluran transmisi ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Model TCSC pada Saluran Transmisi [6]

Hubungan antara rating TCSC dengan reaktansi pada saluran transmisi dinyatakan sebagai berikut :

$$X_{total} = X_{saluran} + X_{TCSC} \quad (19)$$

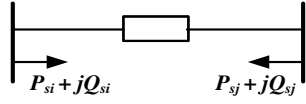
$$X_{TCSC} = r_{TCSC} \times X_{saluran} \quad (20)$$

dengan  $X_{saluran}$  merupakan reaktansi saluran transmisi dan  $r_{TCSC}$  adalah rating kompensasi TCSC.

### C. Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer (TCPST)

TCPST adalah sebuah peralatan yang terhubung seri dengan jaringan. TCPST sangat mirip dengan PAR (*Phase Angle Regulator*) yang konvensional. Tegangan *quadrature* pada sisi primer dimasukkan untuk membuat pergeseran fasa untuk mengontrol sudut transmisi. Perbedaannya dibanding PAR adalah bahwa *tap changer* yang mekanis diganti dengan thyristor yang dikontrol sehingga memungkinkan pengontrolan yang lebih cepat [7]. Daya yang diinjeksikan pada bus

i dan bus j dapat dimodelkan seperti pada Gambar 6. Pemodelan ini disebut dengan pemodelan injeksi.



Gambar 6. Model injeksi TCPST [8]

Perhitungan untuk  $P_{si}$ ,  $Q_{si}$ ,  $P_{sj}$ , dan  $Q_{sj}$  diberikan pada Persamaan (21) sampai (24).

$$P_{si} = \tau bs V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \gamma) \quad (21)$$

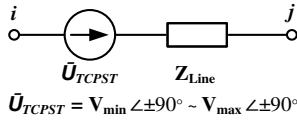
$$Q_{si} = \tau^2 bs V_i^2 - \tau bs V_i V_j \cos(\theta_{ij} + \gamma) \quad (22)$$

$$P_{sj} = -\tau bs V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \gamma) \quad (23)$$

$$Q_{sj} = -\tau bs V_i V_j \cos(\theta_{ij} + \gamma) \quad (24)$$

dengan  $\tau = \frac{|V_s|}{|V_i|}$ ,  $bs = \frac{1}{X_s}$ , dan  $\gamma$  adalah sudut yang dapat diatur oleh TCPST.

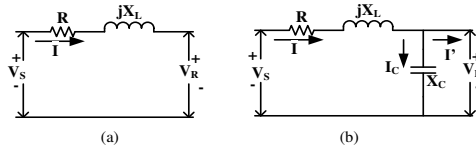
Sudut fasa tegangan yang dapat diatur TCPST berada pada daerah kerja antara  $-5^\circ$  sampai  $5^\circ$ . Gambar 7 menunjukkan pemodelan pemasangan TCPST pada saluran transmisi.



Gambar 7. Model TCSC pada saluran transmisi [6]

#### D. Kapasitor Bank

Kapasitor bank merupakan peralatan listrik yang mempunyai sifat kapasitif yang terdiri dari beberapa kapasitor yang dihubungkan secara paralel untuk mendapatkan kapasitas kapasitif tertentu. Kapasitas kapasitor yang umum digunakan adalah dari 5 KVAR sampai 60 KVAR, dengan rentang tegangan kerja dari 230 volt sampai 525 volt. Beberapa kegunaan dari kapasitor bank yaitu untuk menyeimbangkan beban induktif, perbaikan faktor daya, penyuplai daya reaktif sehingga memaksimalkan penggunaan daya kompleks (KVA), untuk mengurangi jatuh tegangan, menghindari kelebihan beban transformer, memberikan tambahan daya, serta dapat menghemat daya. Rangkaian ekivalen saluran transmisi sebelum dan setelah dipasang kapasitor bank ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Rangkaian ekivalen (a) sebelum dan (b) setelah pemasangan kapasitor bank [9]

Berdasarkan Gambar 8, penurunan tegangan pada saluran transmisi sebelum kapasitor dipasang ditunjukkan pada Persamaan (25).

$$VD = I_R R + I_X X_L \quad (25)$$

Setelah kapasitor ditempatkan secara paralel pada akhir saluran transmisi, maka persamaan penurunan tegangannya ditunjukkan seperti pada Persamaan (26).

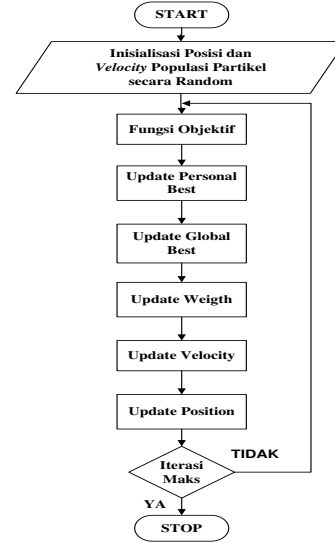
$$VD = I_R R + I_X X_L - I_C X_C \quad (26)$$

Dengan  $VD$  adalah penurunan tegangan dalam volt,  $R$  adalah resistansi saluran dalam ohm,  $X_L$  adalah

reaktansi induktif saluran dalam ohm,  $X_C$  adalah reaktansi kapasitif dari kapasitor dalam ohm,  $I_R$  adalah komponen daya nyata dari arus dalam ampere,  $I_X$  adalah komponen reaktif arus tertinggal dalam ampere,  $I_C$  adalah komponen reaktif arus mendahului dalam ampere, dan  $V_R$  adalah tegangan sisi terima dalam volt.

#### E. Algoritma Particle Swarm Optimization (PSO)

PSO merupakan teknik optimasi yang menerapkan metode pencarian makanan oleh sekelompok burung maupun ikan pada suatu ruang permasalahan. Secara sederhana algoritma PSO dapat dituliskan dalam diagram alir seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Diagram alir PSO [10]

Proses pencarian nilai optimum melalui algoritma PSO dapat dijelaskan sebagai berikut [11] :

1. Inisialisasi posisi partikel secara random pada suatu ruang permasalahan.

$$Posisi\ partikel = Batas\ Bawah + (Batas\ Atas - Batas\ Bawah) \times rand(1, Jumlah\ Par.) \quad (27)$$

2. Inisialisasi kecepatan tiap-tiap partikel.

$$V_{max} = \frac{(Batas\ Atas - Batas\ Bawah)}{N} \quad (28)$$

$$Kecepatan\ partikel = (V_{max} - V_{min}) \times rand(1, Jumlah\ Partikel) + V_{min} \quad (29)$$

3. Evaluasi fungsi tujuan tiap partikel.
4. Menentukan  $P_{best}$  dan  $G_{best}$  mula-mula.

5. Update kecepatan dan posisi partikel ditunjukkan pada Persamaan (31) dan (32). Pada fase ini digunakan koefisien akselerasi  $c_1$  dan  $c_2$  umunya bernilai 0 sampai 4 [12]. Selain itu juga digunakan fungsi penimbang ( $w$ ) untuk mengatur eksplorasi global dan lokal partikel, yang biasanya bernilai 0,4 sampai 0,9. Fungsi perbaikan penimbang ( $weight$ ) dituliskan dalam Persamaan (30).

$$w(t) = (w_{max} - w_{min}) \times \left( \frac{iter_{max} - iter(t)}{iter_{max}} \right) + w_{min} \quad (30)$$

$$V_{id}(t+1) = w(t) \times V_{id}(t) + c_1 \times T_{1d}(t) \times (P_{best\ id}(t) - X_{id}(t)) + c_2 \times T_{2d}(t) \times (G_{bestd}(t) - X_{id}(t)) \quad (31)$$

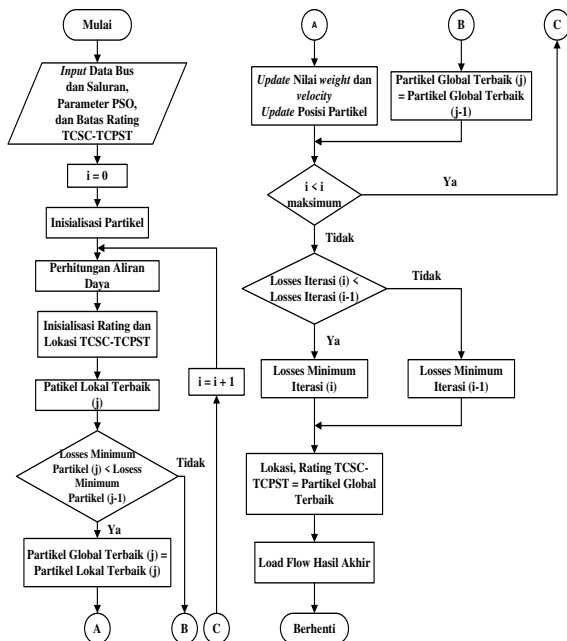
$$X_{id}(t+1) = X_{id}(t) + V_{id}(t) \quad (32)$$

dengan  $t$  merupakan iterasi,  $V_{id}(t)$  adalah kecepatan saat ini dari partikel  $i$  dalam dimensi

d pada iterasi  $t$ ,  $V_{id}(t+1)$  adalah kecepatan dari partikel  $i$  dalam dimensi  $d$  pada iterasi  $t+1$ ,  $X_{id}(t)$  merupakan posisi saat ini dari partikel  $i$  dalam dimensi  $d$  pada iterasi  $t$ ,  $X_{id}(t+1)$  merupakan posisi dari partikel  $i$  dalam dimensi  $d$  pada iterasi  $t+1$ ,  $c_1$  adalah konstanta akselerasi 1 (konstanta kognitif),  $c_2$  adalah konstanta akselerasi 2 (konstanta sosial),  $T_{1d}(t)$  dan  $T_{2d}(t)$  adalah bilangan acak terdistribusi seragam antara 0 dan 1,  $P_{bestid}(t)$  merupakan posisi terbaik lokal dari partikel  $i$  dalam dimensi  $d$  pada iterasi  $t$ , dan  $G_{bestid}(t)$  merupakan posisi terbaik lokal dari global pada iterasi  $t$ .

6. Mengevaluasi nilai fungsi tujuan pada iterasi selanjutnya.
7. Menentukan  $P_{best}$  dan  $G_{best}$  akhir.
8. Mengevaluasi apakah solusi sudah optimal, apabila sudah optimal maka proses algoritma berhenti, namun apabila belum optimal maka kembali ke langkah 3.

Diagram alir dari implementasi algoritma *Particle Swarm Optimization* ditunjukkan pada Gambar 10 dan parameter terkontrol yang digunakan pada algoritma PSO ditunjukkan pada Tabel 1.



Gambar 10. Diagram alir program PSO [11]

Tabel 1. Parameter PSO

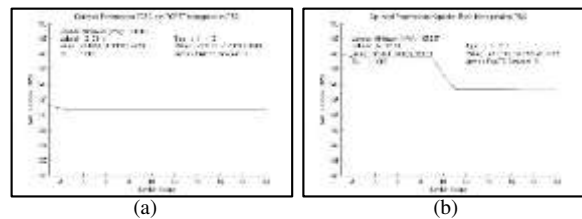
| Parameter                 | Nilai                  |
|---------------------------|------------------------|
| Jumlah Partikel           | 50                     |
| Maksimum Iterasi          | 20                     |
| Jumlah Variabel           | 3                      |
| $c_1$ dan $c_2$           | 4                      |
| weight ( $w$ )            | 0,4                    |
| $r_{TCSC}$ maksimal       | 0,2 $X_{line}$         |
| $r_{TCSC}$ minimal        | - 0,7 $X_{line}$       |
| $\delta_{TCPST}$ maksimal | 5°                     |
| $\delta_{TCPST}$ minimal  | - 5°                   |
| Fungsi Objektif           | Min F = min $P_{loss}$ |

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini, simulasi dilakukan pada dua kondisi pembebanan, yaitu 100% dan 75%. Pada masing-masing pembebanan tersebut juga disimulasikan penempatan kapasitor bank dan koordinasi TCSC-TCPST yang keduanya dioptimasi dengan menggunakan metode PSO. Pada sub bab III ini hasil simulasi pada kondisi sebelum kompensasi, setelah kompensasi kapasitor bank yang dioptimasi PSO, dan setelah kompensasi TCSC-TCPST yang dioptimasi PSO.

#### A. Pembebanan 100%

Hasil simulasi sistem tenaga listrik 500kV JAMALI pada pembebanan 100% dengan 3 kondisi sistem akan dibandingkan berdasarkan nilai tegangan pada tiap bus, rugi daya aktif, dan rugi daya reaktif yang dihasilkan. Grafik konvergensi PSO ditunjukkan pada Gambar 11. Lokasi dan rating optimal TCSC-TCPST ditunjukkan pada Tabel 2, sedangkan untuk kapasitor bank ditunjukkan pada Tabel 3.



Gambar 11. Grafik konvergensi PSO (a) TCSC-TCPST dan (b) kapasitor bank pada Pembebanan 100%

Berdasarkan Gambar 11 titik konvergensi penempatan optimal TCSC-TCPST dicapai pada iterasi ke-3 sedangkan untuk kapasitor bank dicapai pada iterasi ke-17.

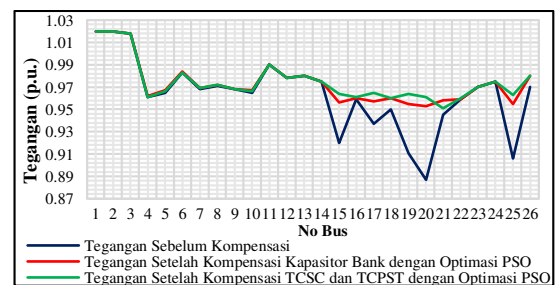
Tabel 2. Penempatan optimal TCSC-TCPST oleh PSO pada pembebanan 100%

| Jenis | Lokasi (saluran) | Dari Bus | Menuju Bus   | Rating            |
|-------|------------------|----------|--------------|-------------------|
| TCSC  | 2                | Suralaya | Cilegon      | -0,318 $X_{line}$ |
| TCSC  | 21               | Ungaran  | Tanjung Jati | -0,700 $X_{line}$ |
| TCPST | 4                | Cilegon  | Cibinong     | 2,385°            |

Tabel 3. Penempatan optimal kapasitor bank oleh PSO pada pembebanan 100%

| Jenis          | Lokasi (bus)     | Rating (MVAR) |
|----------------|------------------|---------------|
| Kapasitor Bank | 15 (Tasikmalaya) | 49,163        |
| Kapasitor Bank | 19 (Ungaran)     | 34,023        |
| Kapasitor Bank | 20 (Pedan)       | 47,104        |

Tegangan tiap bus ditunjukkan pada Gambar 12 dan Tabel 4.



Gambar 12. Perbandingan profil tegangan pada pembebanan 100%

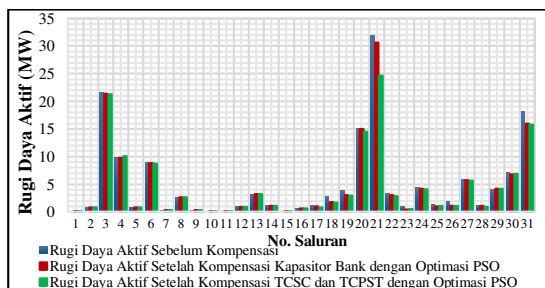
Tabel 4. Perbandingan level tegangan dari 3 kondisi sistem pada pembebanan 100%

| No | Nama Bus     | Tegangan (p.u.) |               |            | No | Nama Bus     | Tegangan (p.u.) |               |            |
|----|--------------|-----------------|---------------|------------|----|--------------|-----------------|---------------|------------|
|    |              | Sebelum         | Kap. Bank PSO | TCSC-TCPST |    |              | Sebelum         | Kap. Bank PSO | TCSC-TCPST |
| 1  | New Surabaya | 1,020           | 1,020         | 1,020      | 14 | Saguling     | 0,975           | 0,975         | 0,975      |
| 2  | Surabaya     | 1,020           | 1,020         | 1,020      | 15 | Tasikmalaya  | 0,920           | 0,956         | 0,964      |
| 3  | Cikgon       | 1,018           | 1,018         | 1,018      | 16 | Bandung Slt  | 0,959           | 0,960         | 0,961      |
| 4  | Kembangan    | 0,961           | 0,962         | 0,961      | 17 | Mandiracan   | 0,937           | 0,957         | 0,965      |
| 5  | Gandul       | 0,965           | 0,967         | 0,966      | 18 | Tanjung Jati | 0,950           | 0,960         | 0,960      |
| 6  | Balaraja     | 0,983           | 0,984         | 0,983      | 19 | Ungaran      | 0,911           | 0,955         | 0,964      |
| 7  | Cibinong     | 0,968           | 0,969         | 0,969      | 20 | Pedan        | 0,887           | 0,953         | 0,961      |
| 8  | Cawang       | 0,971           | 0,972         | 0,972      | 21 | Ngimbang     | 0,945           | 0,958         | 0,951      |
| 9  | Bekasi       | 0,968           | 0,968         | 0,968      | 22 | Surabaya Bt  | 0,959           | 0,959         | 0,960      |
| 10 | Depok        | 0,965           | 0,967         | 0,966      | 23 | Gresik       | 0,970           | 0,970         | 0,970      |
| 11 | Muara Tawar  | 0,990           | 0,990         | 0,990      | 24 | Grati        | 0,975           | 0,975         | 0,975      |
| 12 | Cibatu       | 0,978           | 0,978         | 0,978      | 25 | Kediri       | 0,906           | 0,955         | 0,963      |
| 13 | Cirata       | 0,980           | 0,980         | 0,980      | 26 | Paon         | 0,970           | 0,980         | 0,980      |

Berdasarkan Gambar 12 dan Tabel 4 dapat dilihat bahwa terjadi perbaikan level tegangan pada bus-bus yang tidak memenuhi batas tegangan yang diijinkan. Penempatan TCSC-TCPST memiliki hasil perbaikan level tegangan lebih baik daripada penempatan kapasitor bank. Rugi daya aktif saluran ditunjukkan pada Gambar 13 dan Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan rugi daya aktif dari 3 kondisi sistem pada pembebanan 100%

| No Saluran | Rugi Daya Aktif (MW) |               |            | No Saluran   | Rugi Daya Aktif (MW) |                |                |
|------------|----------------------|---------------|------------|--------------|----------------------|----------------|----------------|
|            | Sebelum              | Kap. Bank PSO | TCSC-TCPST |              | Sebelum              | Kap. Bank PSO  | TCSC-TCPST     |
| 1 2-1      | 0,001                | 0,001         | 0,001      | 17 14-16     | 1,109                | 0,980          | 0,803          |
| 2 2-3      | 0,809                | 0,806         | 0,820      | 18 15-10     | 2,811                | 1,729          | 1,681          |
| 3 2-6      | 21,57                | 21,394        | 21,215     | 19 17-16     | 3,756                | 2,990          | 2,960          |
| 4 3-7      | 9,869                | 9,794         | 10,031     | 20 17-19     | 15,088               | 14,976         | 14,506         |
| 5 5-4      | 0,824                | 0,822         | 0,822      | 21 19-18     | 31,896               | 30,585         | 24,623         |
| 6 5-6      | 8,898                | 8,807         | 8,701      | 22 19-20     | 3,422                | 2,994          | 2,796          |
| 7 7-14     | 0,309                | 0,289         | 0,297      | 23 19-21     | 0,975                | 0,449          | 0,542          |
| 8 9-7      | 2,686                | 2,681         | 2,678      | 24 20-15     | 4,437                | 4,202          | 4,135          |
| 9 9-8      | 0,306                | 0,300         | 0,302      | 25 21-22     | 1,285                | 0,973          | 1,125          |
| 10 10-5    | 0,024                | 0,022         | 0,020      | 26 22-19     | 1,863                | 1,074          | 1,121          |
| 11 10-7    | 0,130                | 0,100         | 0,104      | 27 22-24     | 5,779                | 5,694          | 5,666          |
| 12 11-7    | 0,977                | 0,915         | 0,924      | 28 23-22     | 1,170                | 1,067          | 0,924          |
| 13 11-8    | 3,236                | 3,209         | 3,215      | 29 25-20     | 4,073                | 4,183          | 4,183          |
| 14 12-11   | 1,098                | 1,099         | 1,096      | 30 26-24     | 7,156                | 6,816          | 6,837          |
| 15 12-13   | 0,130                | 0,129         | 0,130      | 31 26-25     | 18,191               | 15,952         | 15,733         |
| 16 14-13   | 0,608                | 0,607         | 0,609      | <b>Total</b> | <b>154,486</b>       | <b>145,639</b> | <b>138,603</b> |

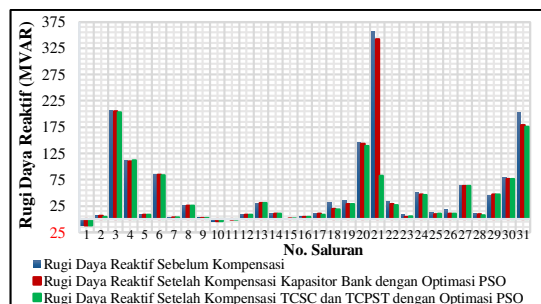


Gambar 13. Perbandingan profil rugi daya aktif pada pembebanan 100%

Berdasarkan Gambar 13 dan Tabel 5, adanya kompensasi kapasitor bank yang dioptimasi PSO dapat mengurangi rugi daya aktif sebesar 8,847 MW (5,727%). Kompensasi peralatan FACTS dengan koordinasi TCSC dan TCPST mampu mengurangi rugi daya aktif sebesar 15,883 MW (10,28%).

Tabel 6. Perbandingan rugi daya reaktif dari 3 kondisi sistem pada pembebanan 100%

| No Saluran | Rugi Daya Reaktif (MVAR) |               |            | No Saluran   | Rugi Daya Reaktif (MVAR) |                  |                  |
|------------|--------------------------|---------------|------------|--------------|--------------------------|------------------|------------------|
|            | Sebelum                  | Kap. Bank PSO | TCSC-TCPST |              | Sebelum                  | Kap. Bank PSO    | TCSC-TCPST       |
| 1 2-1      | -11,815                  | -11,815       | -11,815    | 17 14-16     | 11,720                   | 10,277           | 8,298            |
| 2 2-3      | 6,677                    | 6,642         | 3,884      | 18 15-10     | 31,357                   | 19,246           | 18,710           |
| 3 2-6      | 206,775                  | 205,086       | 203,371    | 19 17-16     | 35,875                   | 28,510           | 28,218           |
| 4 3-7      | 110,304                  | 109,465       | 112,116    | 20 17-19     | 144,856                  | 143,769          | 139,255          |
| 5 5-4      | 8,338                    | 8,313         | 8,316      | 21 19-18     | 356,64                   | 341,959          | 82,441           |
| 6 5-6      | 84,933                   | 84,054        | 83,037     | 22 19-20     | 32,728                   | 28,601           | 26,696           |
| 7 7-14     | 3,127                    | 2,904         | 2,992      | 23 19-21     | 9,303                    | 4,245            | 5,139            |
| 8 9-7      | 25,455                   | 25,402        | 25,381     | 24 20-15     | 49,566                   | 46,927           | 46,169           |
| 9 9-8      | 2,145                    | 2,092         | 2,104      | 25 21-22     | 12,097                   | 9,090            | 10,551           |
| 10 10-5    | -4,241                   | -4,270        | -4,283     | 26 22-19     | 17,850                   | 10,262           | 10,717           |
| 11 10-7    | -0,456                   | -0,747        | -0,706     | 27 22-24     | 64,320                   | 63,362           | 63,051           |
| 12 11-7    | 9,130                    | 8,532         | 8,624      | 28 23-22     | 10,131                   | 9,148            | 7,767            |
| 13 11-8    | 30,805                   | 30,541        | 30,606     | 29 25-20     | 45,448                   | 46,674           | 46,670           |
| 14 12-11   | 9,976                    | 9,989         | 9,958      | 30 26-24     | 79,737                   | 75,925           | 76,167           |
| 15 12-13   | 0,654                    | 0,648         | 0,661      | 31 26-25     | 203,384                  | 178,325          | 175,881          |
| 16 14-13   | 4,763                    | 4,755         | 4,775      | <b>Total</b> | <b>1,591,582</b>         | <b>1,497,911</b> | <b>1,224,751</b> |

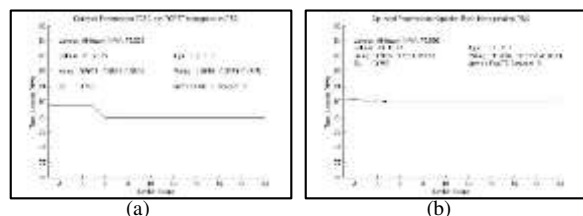


Gambar 14. Perbandingan profil rugi daya reaktif pada pembebanan 100%

Berdasarkan Gambar 14 dan Tabel 6, adanya kompensasi kapasitor bank yang dioptimasi PSO dapat mengurangi rugi daya reaktif sebesar 93,571 MVAR (5,885%), sedangkan kompensasi peralatan FACTS dengan koordinasi TCSC dan TCPST mampu mengurangi rugi daya reaktif sebesar 366,831 MVAR (23,048%).

## B. Pembebanan 75%

Hasil simulasi sistem tenaga listrik 500kV JAMALI pada pembebanan 75% dengan 3 kondisi sistem dibandingkan berdasarkan nilai tegangan pada tiap bus, rugi daya aktif, dan rugi daya reaktif yang dihasilkan. Grafik konvergensi PSO ditunjukkan pada Gambar 15. Lokasi dan rating optimal TCSC-TCPST ditunjukkan pada Tabel 7 sedangkan untuk kapasitor bank ditunjukkan pada Tabel 8.



Gambar 15. Grafik konvergensi PSO (a) TCSC-TCPST dan (b) kapasitor bank pada Pembebanan 75%

Berdasarkan Gambar 15 titik konvergensi penempatan optimal TCSC-TCPST dicapai pada iterasi ke-6 begitu pula untuk kapasitor bank dicapai pada iterasi ke-5.

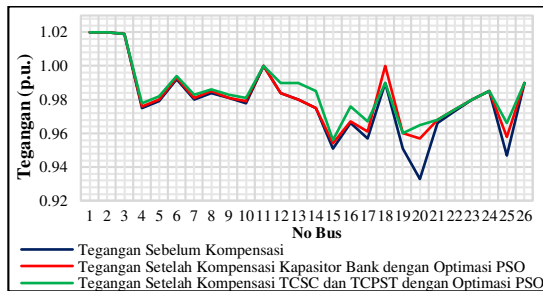


Tabel 7. Penempatan optimal TCSC-TCPST oleh PSO pada pembebanan 75%

| Jenis | Lokasi (saluran) | Dari Bus | Menuju Bus   | Rating                  |
|-------|------------------|----------|--------------|-------------------------|
| TCPST | 11               | Depok    | Cibinong     | 1,951°                  |
| TCSC  | 15               | Cibatu   | Cirata       | -0,452X <sub>line</sub> |
| TCSC  | 21               | Ungaran  | Tanjung Jati | -0,378X <sub>line</sub> |

Tabel 8. Penempatan optimal kapasitor bank oleh PSO pada pembebanan 75%

| Jenis          | Lokasi (bus) | Rating (MVAR) |
|----------------|--------------|---------------|
| Kapasitor Bank | 10 (Depok)   | 36,017        |
| Kapasitor Bank | 19 (Ungaran) | 39,481        |
| Kapasitor Bank | 20 (Pedan)   | 48,862        |

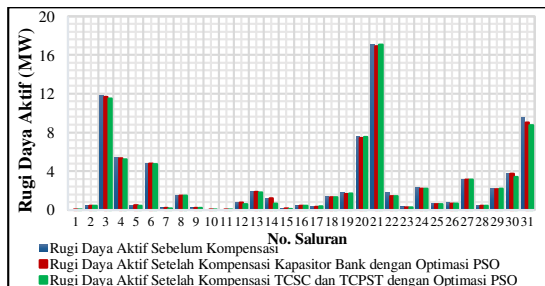


Gambar 16. Perbandingan profil tegangan pada pembebanan 75%

Tabel 9. Perbandingan level tegangan dari 3 kondisi sistem pada pembebanan 75%

| No | Nama Bus     | Tegangan (p.u.) |               |            | No | Nama Bus     | Tegangan (p.u.) |               |            |
|----|--------------|-----------------|---------------|------------|----|--------------|-----------------|---------------|------------|
|    |              | Sebelum         | Kap. Bank PSO | TCSC-TCPST |    |              | Sebelum         | Kap. Bank PSO | TCSC-TCPST |
| 1  | New Surabaya | 1,020           | 1,020         | 1,020      | 14 | Saguling     | 0,975           | 0,975         | 0,985      |
| 2  | Surabaya     | 1,020           | 1,020         | 1,020      | 15 | Tasikmalaya  | 0,951           | 0,954         | 0,956      |
| 3  | Cilegon      | 1,019           | 1,019         | 1,019      | 16 | Bandung Sdn  | 0,966           | 0,967         | 0,976      |
| 4  | Kembangan    | 0,975           | 0,976         | 0,978      | 17 | Mandiracan   | 0,957           | 0,961         | 0,967      |
| 5  | Gandul       | 0,979           | 0,980         | 0,982      | 18 | Tanjung Jati | 0,990           | 1,000         | 0,990      |
| 6  | Balaraja     | 0,992           | 0,993         | 0,994      | 19 | Ungaran      | 0,951           | 0,960         | 0,960      |
| 7  | Cibinong     | 0,980           | 0,981         | 0,983      | 20 | Pedan        | 0,933           | 0,957         | 0,965      |
| 8  | Cawang       | 0,984           | 0,985         | 0,986      | 21 | Ngimbang     | 0,966           | 0,968         | 0,968      |
| 9  | Bekasi       | 0,981           | 0,981         | 0,983      | 22 | Surabaya Bt  | 0,973           | 0,974         | 0,974      |
| 10 | Depok        | 0,978           | 0,979         | 0,981      | 23 | Gresik       | 0,980           | 0,980         | 0,980      |
| 11 | Muara Tawar  | 1,000           | 1,000         | 1,000      | 24 | Grati        | 0,985           | 0,985         | 0,985      |
| 12 | Cibatu       | 0,984           | 0,984         | 0,990      | 25 | Kediri       | 0,947           | 0,958         | 0,966      |
| 13 | Cirata       | 0,980           | 0,980         | 0,990      | 26 | Pañon        | 0,990           | 0,990         | 0,990      |

Berdasarkan Gambar 16 dan Tabel 9 dapat dilihat bahwa terjadi perbaikan level tegangan pada bus 20 dan bus 25. Penempatan TCSC-TCPST memiliki hasil perbaikan level tegangan lebih baik daripada penempatan kapasitor bank. Rugi daya aktif saluran ditunjukkan pada Gambar 17 dan Tabel 10.



Gambar 17. Perbandingan profil rugi daya aktif pada pembebanan 75%

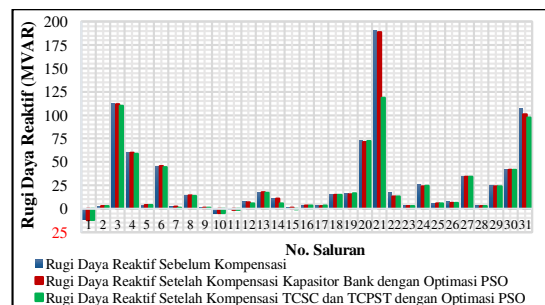
Tabel 10. Perbandingan rugi daya aktif dari 3 kondisi sistem pada pembebanan 75%

| No | Saluran | Rugi Daya Aktif (MW) |               |            | No    | Saluran | Rugi Daya Aktif (MW) |               |            |
|----|---------|----------------------|---------------|------------|-------|---------|----------------------|---------------|------------|
|    |         | Sebelum              | Kap. Bank PSO | TCSC-TCPST |       |         | Sebelum              | Kap. Bank PSO | TCSC-TCPST |
| 1  | 2-1     | 0,001                | 0,001         | 0,001      | 17    | 14-16   | 0,373                | 0,311         | 0,378      |
| 2  | 2-3     | 0,443                | 0,442         | 0,439      | 18    | 15-10   | 1,375                | 1,302         | 1,303      |
| 3  | 2-6     | 11,752               | 11,672        | 11,515     | 19    | 17-16   | 1,716                | 1,633         | 1,715      |
| 4  | 3-7     | 5,375                | 5,341         | 5,239      | 20    | 17-19   | 7,597                | 7,414         | 7,530      |
| 5  | 5-4     | 0,449                | 0,449         | 0,447      | 21    | 19-18   | 17,048               | 16,883        | 17,087     |
| 6  | 5-6     | 4,819                | 4,778         | 4,698      | 22    | 19-20   | 1,790                | 1,393         | 1,401      |
| 7  | 7-14    | 0,208                | 0,225         | 0,130      | 23    | 19-21   | 0,334                | 0,281         | 0,279      |
| 8  | 9-7     | 1,491                | 1,485         | 1,441      | 24    | 20-15   | 2,310                | 2,157         | 2,182      |
| 9  | 9-8     | 0,187                | 0,183         | 0,174      | 25    | 21-22   | 0,618                | 0,591         | 0,591      |
| 10 | 10-5    | 0,014                | 0,013         | 0,011      | 26    | 22-19   | 0,741                | 0,663         | 0,660      |
| 11 | 10-7    | 0,034                | 0,023         | 0,048      | 27    | 22-24   | 3,123                | 3,104         | 3,105      |
| 12 | 11-7    | 0,778                | 0,734         | 0,584      | 28    | 23-22   | 0,483                | 0,430         | 0,427      |
| 13 | 11-8    | 18,556               | 1,840         | 1,805      | 29    | 25-20   | 2,206                | 2,129         | 2,159      |
| 14 | 12-11   | 1,164                | 1,164         | 0,664      | 30    | 26-24   | 3,732                | 3,733         | 3,375      |
| 15 | 12-13   | 0,160                | 0,160         | 0,078      | 31    | 26-25   | 9,587                | 9,027         | 8,750      |
| 16 | 14-13   | 0,435                | 0,435         | 0,447      | Total |         | 82,202               | 79,996        | 79,023     |

Berdasarkan Gambar 17 dan Tabel 10 dengan adanya kompensasi kapasitor bank yang dioptimasi PSO dapat mereduksi rugi daya aktif sebesar 2,206 MW (2,684%) dan dengan kompensasi peralatan FACTS yaitu koordinasi TCSC dan TCPST mampu mereduksi rugi daya aktif sebesar 3,179 MW (3,867%). Rugi daya aktif saluran ditunjukkan pada Gambar 18 dan Tabel 11.

Tabel 11. Perbandingan rugi daya reaktif dari 3 kondisi sistem pada pembebanan 75%

| No | Saluran | Rugi Daya Reaktif (MVAR) |               |            | No    | Saluran | Rugi Daya Reaktif (MVAR) |               |            |
|----|---------|--------------------------|---------------|------------|-------|---------|--------------------------|---------------|------------|
|    |         | Sebelum                  | Kap. Bank PSO | TCSC-TCPST |       |         | Sebelum                  | Kap. Bank PSO | TCSC-TCPST |
| 1  | 2-1     | -11,820                  | -11,820       | -11,820    | 17    | 14-16   | 3,485                    | 2,794         | 3,524      |
| 2  | 2-3     | 2,585                    | 2,572         | 2,543      | 18    | 15-10   | 15,289                   | 14,475        | 14,484     |
| 3  | 2-6     | 112,449                  | 111,682       | 110,169    | 19    | 17-16   | 16,266                   | 15,467        | 16,257     |
| 4  | 3-7     | 60,023                   | 59,647        | 58,504     | 20    | 17-19   | 72,880                   | 71,116        | 72,234     |
| 5  | 5-4     | 4,127                    | 4,115         | 4,091      | 21    | 19-18   | 190,523                  | 188,671       | 188,700    |
| 6  | 5-6     | 45,744                   | 45,345        | 44,580     | 22    | 19-20   | 17,037                   | 13,210        | 13,291     |
| 7  | 7-14    | 2,000                    | 2,186         | 1,116      | 23    | 19-21   | 3,142                    | 2,630         | 2,613      |
| 8  | 9-7     | 13,961                   | 13,906        | 13,481     | 24    | 20-15   | 25,764                   | 24,044        | 24,319     |
| 9  | 9-8     | 0,978                    | 0,942         | 0,856      | 25    | 21-22   | 5,675                    | 5,420         | 5,411      |
| 10 | 10-5    | -4,456                   | -4,478        | -4,519     | 26    | 22-19   | 7,067                    | 6,318         | 6,293      |
| 11 | 10-7    | -1,418                   | -1,532        | -1,300     | 27    | 22-24   | 34,595                   | 34,383        | 34,391     |
| 12 | 11-7    | 7,215                    | 6,787         | 5,347      | 28    | 23-22   | 3,508                    | 2,998         | 2,966      |
| 13 | 11-8    | 17,540                   | 17,384        | 17,048     | 29    | 25-20   | 3,560                    | 23,693        | 24,019     |
| 14 | 12-11   | 10,604                   | 10,602        | 5,799      | 30    | 26-24   | 41,419                   | 41,431        | 41,458     |
| 15 | 12-13   | 0,939                    | 0,940         | -0,19      | 31    | 26-25   | 107,123                  | 100,851       | 97,750     |
| 16 | 14-13   | 3,096                    | 3,097         | 3,197      | Total |         | 831,898                  | 808,876       | 726,611    |



Gambar 18. Perbandingan profil rugi daya reaktif pada pembebanan 75%

Dari Gambar 18 dan Tabel 11 dengan adanya kompensasi kapasitor bank yang dioptimasi PSO dapat mereduksi rugi daya reaktif sebesar 23,022 MVAR (2,767%) dan dengan kompensasi peralatan FACTS yaitu koordinasi TCSC dan TCPST mampu mereduksi rugi daya reaktif sebesar 105,287 MVAR (12,656%).



#### IV. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Penempatan optimal untuk TCSC-TCPST pada pembebanan 100% dan 75% dapat meningkatkan kapabilitas saluran transmisi dalam penyaluran daya dan mampu meminimumkan rugi-rugi daya aktif saluran transmisi pada sistem tenaga listrik 500kV Jawa-Madura-Bali.
2. Penerapan metode PSO pada penempatan optimal dan rating dari TCSC-TCPST dapat mengurangi rugi daya aktif sistem tenaga listrik 500kV Jawa-Madura-Bali hingga 15,883 MW atau sebesar 10,28% pada pembebanan 100% dan 3,179 MW atau sebesar 3,867% pada pembebanan 75%. Hasil ini jauh lebih baik jika dibandingkan dengan penggunaan kapasitor bank yang dioptimasi PSO yang hanya mampu mengurangi hingga 8,847 MW atau sebesar 5,727% pada pembebanan 100% dan 2,206 MW atau sebesar 2,684% pada pembebanan 75%.
3. Penempatan optimal TCSC dan TCPST pada saluran transmisi dengan optimasi menggunakan PSO mampu memperbaiki nilai tegangan pada tiap bus sistem yang mengalami penurunan (*drop*) tegangan sehingga berada pada batas tegangan yang diijinkan yaitu  $1 \pm 5\%$  p.u. ( $0,95 \leq V_{bus} \leq 1,05$  p.u.).

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hastanto, A. 2012. Optimasi Penempatan SVC untuk Memperbaiki Profil Tegangan pada Sistem 500 kV JAMALI Menggunakan Metode Particle Swarm Optimization (PSO). Semarang: Universitas Diponegoro.
- [2] Supriatna, G. 2013. *Optimasi Sistem Interkoneksi 500 kV Jawa – Bali dengan Aliran Daya Optimal MINOPF*. Tugas Akhir. UPI, Bandung.
- [3] Saadat, H. 1999. *Power System Analysis*. McGraw-Hill: International Edition.
- [4] Acha, E., dkk. 2004. *FACTS Modelling and Simulation in Power Networks*. John Wiley & Sons Ltd.
- [5] Jumaat, S. A., dkk. 2012. *Optimal Placement and Sizing of Multiple FACTS Devices Installation*. IEEE International Conference on Power and Energy. Kota Kinabalu Sabah, Malaysia, 2-5 Desember 2012.
- [6] Cai, L. J. & Erlich, I. 2004. *Optimal Choice and Allocation of FACTS Device in Deregulated Electricity Market using Genetic Algorithm*. IEEE Transaction On Power System.
- [7] Glanzmann, G. & Andersson, G. 2004. *Coordinated Control of FACTS Devices base on Optimal Power Flow*.
- [8] Yulyardhita, R. 2013. *Penempatan dan Penentuan Kapasitas Optimal TCPST pada Sistem Jawa Bali 500 kV*. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [9] Erviana, M. 2012. *Optimasi Penempatan Kapasitor Bank Pada Sistem Distribusi Untuk Mereduksi Rugi Daya Menggunakan Particle Swarm Optimization*. Semarang : Universitas Diponegoro.
- [10] Krisida, R. A. 2010. *Optimisasi Pengaturan Daya Reaktif dan Tegangan pada Sistem Interkoneksi Jawa Bali 500 kV Menggunakan Quantum Behaved Particle Swarm Optimization*. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [11] Alfarizy, F. 2012. *Penempatan Optimal Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) dan Static Var Compensator (SVC) Menggunakan Quantum Behaved Particle Swarm Optimization (QPSO) untuk Pembebanan Maksimum*. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [12] Tuegeh, M., dkk. 2009. *Modified Improved Particle Swarm Optimization for Optimal Generator Scheduling*. Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Informasi. Yogyakarta, 20 Juni 2009.